

UTILIZACIÓN DE LAS MORFOLOGÍAS DE LAPIAZ COMO GEOINDICADORES ECOLÓGICOS EN LA SERRA DE TRAMUNTANA (Mallorca)

por Ángel GINÉS*

Resum

Les morfologies de lapiaz, en ésser l'efecte de la dissolució de les roques calcàries sota el control de diversos factors físico-químics, podrien resultar de gran interès en estudis ecològics pel fet de proporcionar informació sobre climes passats o presents i de posar en evidència els processos de deforestació que han sofert els terrenys càrstics. La utilització de diferents tipus de lapiaz per avaluar algunes característiques ecològiques significatives ha estat assajada per primera vegada a la Serra de Tramuntana (Mallorca) amb bastant d'èxit.

Els resultats preliminars, obtinguts a partir de 98 localitats distribuïdes per tota la Serra, permeten de reconèixer fàcilment una zonació vertical dels camps de lapiaz en bona concordança amb la distribució de comunitats vegetals i amb els principals gradients climàtics, tals com la temperatura mitjana i la quantitat de precipitacions. Les dades més concloents han procedit de l'anàlisi morfomètrica de 2.000 estries de lapiaz, mesurades a 40 localitats distintes: s'ha pogut comprovar que les estries són significativament més llargues a altituds baixes, coincidint amb climes més càlids, mentre que només es troben abundants estries de lapiaz en aquells terrenys càrstics que reben més de 800 mm anuals de pluja.

Abstract

Karren landforms, as an effect of solutional erosion on limestone rocks controlled by a couple of physico-chemical factors, should have great interest in ecological studies providing information about past or present climates and yielding evidence of deforestation processes in karstic areas. A first approach to this use of different karren types to evaluate some ecological conditions has been essayed in the northern mountain ridge of Mallorca, named Serra de Tramuntana.

Preliminary results obtained from 98 locations in the Serra suggest that a vertical zonation of karren landscapes can be easily established, and they also agree with the distribution of plant communities as well as with the main climatic gradients, like mean temperature and amount of precipitations. The most outstanding data have been provided by nearly 2000 morphometrical observations of rillenkarren measured in 40 different locations: they show significantly how longer rills appear at lower altitudes on warmer places whilst rills are only found widespread in karstic outcrops receiving more than 800 mm of annual rainfall.

Introducción

Los campos de lapiaz ocupan considerables extensiones en la Serra de Tramuntana (Mallorca) y constituyen uno de los rasgos más característicos que intervienen en la configuración de su paisaje. Viajeros del siglo pasado, geólogos y geógrafos ya mencionaron

insistentemente sus formas más espectaculares, como las que enmarcan el Torrent de Pareis o los conocidos Pixarells de Lluc (PAGENSTECHER, 1867; LOZANO, 1884; MARTEL, 1903; PRAESSENT, 1911; FALLOT, 1922; DARDER, 1930 y MENSCHING, 1955, entre otros). Aunque trabajos más recientes han documentado gráficamente estas morfologías o han vuelto a incidir en el alto interés de las formas de lapiaz exis-

* Federació Balear d'Espeleologia; Laboratori d'Ecologia, Universitat de les Illes Balears, carretera de Valldemossa km. 7.5, 07071 Palma de Mallorca.

tentes en la Serra (COLOM, 1975; BÖGLI, 1976; GINÉS *et al.*, 1979; BÖGLI, 1980; COLOM, 1982; BÄR *et al.*, 1986), las únicas aportaciones bibliográficas que proporcionan algunas precisiones sobre la tipología del lapiaz de la montaña mallorquina corresponden a BÄR (1989) y GINÉS & GINÉS (1979; 1989).

Considerada en su conjunto, la Serra de Tramuntana se comporta como una gran montaña caliza ideal en la que se manifiestan gradientes altitudinales, pluviométricos y termométricos bastante acentuados y casi regularmente espaciados a ambos lados de su máxima cota topográfica (Puig Major, 1.443 metros s.n.m.), aunque con una ligera asimetría a favor de su extremo NE. Estas condiciones la hacen especialmente adecuada para estudiar problemas de zonación altimétrica del lapiaz y para intentar cuantificar y correlacionar las características morfométricas de estas formas exokársticas con parámetros físico-químicos, climáticos y ambientales en general.

Los datos procedentes de una reciente tesis doctoral elaborada por un compañero del Lab. d'Ecologia (Universitat de les Illes Balears) han permitido disponer de una base de mapas climáticos mensuales y anuales para cuadrículas UTM de 1 km², que facilitan mucho la realización de estudios geoclimáticos y ecológicos (GUIJARRO, 1986). Con este punto de partida, inicié hace 2 años una amplia campaña de recolección de datos morfométricos en el lapiaz de la Serra de Tramuntana, incluyendo descripciones semicuantitativas y mediciones que pudieran ser objeto de tratamiento estadístico y análisis factorial. Un primer avance de los resultados obtenidos fue incorporado en una Memoria de Investigación presentada en la Universitat de les Illes Balears hace poco tiempo (GINÉS, 1989). En la actualidad, las localidades de lapiaz muestreadas son 98 y abarcan la mayor parte de la principal cordillera mallorquina (Figura 1). Ciertamente el excepcional desarrollo que alcanza esta clase de morfologías exokársticas en la Serra de Tramuntana merece la realización de estudios detallados, que quizás el presente trabajo podría estimular en lo sucesivo.

Tipología e interpretación ecológica del Lapiaz

Los factores que controlan el desarrollo de las diversas formas de lapiaz tienen un fuerte significado ecológico que justificaría la puesta a punto de una metodología capaz de descifrar la «información potencial» que contienen. La presencia de suelo vegetal sobre la superficie del karst o los efectos de la exposición a la intemperie (cuando las rocas calizas están desprovistas de él) presentan, en ambos casos, una diversificada trama de interacciones con el entorno, de tal manera que de ello resulta una complicadísima gama de morfologías difíciles de clasificar de un modo sistemático.

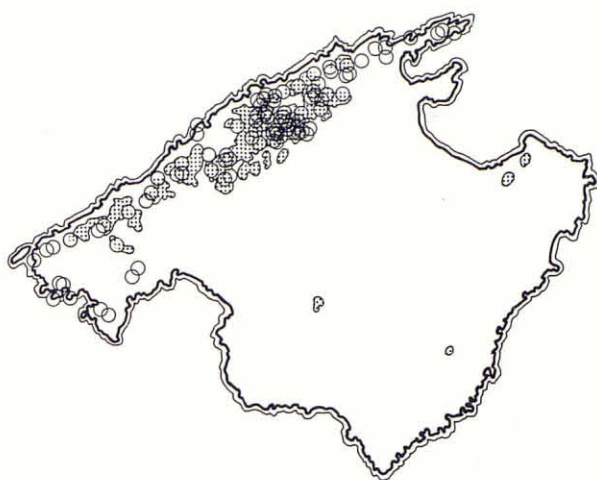


Figura 1: Situación de las localidades muestreadas para la realización del presente trabajo. En el dibujo se han remarcado mediante una trama de puntos los terrenos situados por encima de la cota de 500 metros s.n.m.

La mayor parte de los autores hacen una primera clasificación del Lapiaz distinguiendo entre *Lapiaz libre* y *Lapiaz cubierto* (BAUER, 1962; SWEETING, 1972; BÖGLI, 1980; JENNINGS, 1985; WHITE, 1988); entendiendo por lapiaz cubierto aquel que ha sido modelado bajo el suelo. Este criterio presupone la posibilidad de reconocer en el exokarst evidencias de deforestación, y de pérdida de suelo por erosión, o de corrosión biógena asociada a raíces de plantas y a procesos bioquímicos potenciados por la actividad de microorganismos edáficos.

En el lapiaz expuesto a la intemperie, la cantidad, duración e intensidad de la lluvia o el régimen de precipitaciones propio de cada tipo de clima parecen tener una importancia decisiva en la conformación, sobre la roca caliza, de unas u otras microformas de corrosión. El componente climático capaz de influir en el desarrollo del lapiaz se extiende también a la temperatura existente durante las épocas de lluvias o a la disponibilidad de aguas de fusión de nieve. También el rocío y las heladas pueden interferir sobre esta clase de micromodelados, e incluso la aridez puede provocar interferencias muy particulares. Las revisiones sobre la morfogénesis del lapiaz publicadas por SWEETING (1972), BÖGLI (1980), JENNINGS (1985) y FORD & WILLIAMS (1989) sugieren o debaten la importancia del clima en la formación de las distintas modalidades de lapiaz.

Aunque sería poco realista ignorar otros condicionantes topográficos, litológicos y tectónicos, resulta evidente que los factores bioclimáticos juegan un papel muy sutil en el micro y mesomodelado de las morfologías de lapiaz. La instalación de algas, hongos y líquenes, sobre la roca libre de suelo y expuesta a diferentes orientaciones, añade otro aspecto geobiológico al problema, tal como lo han demostrado HEINEMANN *et al.* (1977) mediante métodos cuantitativos. Por si

fuera poco, es preciso indicar que hasta los factores hidrodinámicos, responsables de algunas microformas específicas, dependen indirectamente de la climatología, debido a que las características del aporte hídrico y del flujo del agua están reguladas por la naturaleza de las precipitaciones y por la intensidad de la lluvia.

De una manera análoga a como lo hacen las asociaciones vegetales, es probable que el conjunto de morfologías de los campos de lapiaz realice una integración de factores climáticos y ambientales paralela a la que realiza la parte viva del ecosistema kárstico. Las asociaciones de micro y mesoformas de lapiaz serían, en ese supuesto, útiles para proporcionar datos morfométricos y cuantitativos que podrían solaparse con la información procedente del estudio semicuantitativo de las comunidades vegetales naturales.

La variedad de formas de lapiaz es enorme y corresponde a la complejidad de las interacciones físico-químicas y ecológicas que pueden intervenir en su generación. Además de la bibliografía ya citada, ha habido muchos intentos de clasificar desde un punto de vista morfológico y genético la gran diversidad de tipos de lapiaz existentes y de establecer una terminología suficientemente precisa (BÖGLI, 1960; TRIMMEL, 1965; GÈZE, 1973; PERNA & SAURO, 1978 y MAIRE, 1980, entre otros). La clasificación más aceptada entre los karstólogos es la de BÖGLI (1960), que lleva implícito un cierto contenido genético y que es utilizada frecuentemente en la bibliografía internacional con sus términos originales alemanes. BÄR (1989) describe con dicha terminología los campos de lapiaz de los alrededores de Lluç. Sin embargo otros estudios más recientes ba-

sados en modelos experimentales de escayola y en nuevos datos de campo (FORD & LUNDBERG, 1987; DZULYNSKI *et al.*, 1988; FORD & WILLIAMS, 1989) han ampliado las interpretaciones genéticas de BÖGLI planteando la necesidad de matizar algunos aspectos.

Personalmente he optado por elaborar una terminología en lengua castellana que se adapta a las circunstancias concretas del estudio del karst mallorquín y que pretende integrar lo más sustancial de las clasificaciones disponibles. La Tabla I resume la terminología traducida que propongo, indicando los sinónimos más usuales en la bibliografía escrita en otros idiomas. Aunque no es posible exponer aquí las pautas seguidas en la adopción de estos términos, se ha intentado conjugar criterios genéticos con caracteres morfológicos que fueran suficientemente excluyentes para cada uno de los tipos de lapiaz seleccionados.

La complejidad y diversificación morfológica del lapiaz, junto con el control climático y biológico que parece evidenciarse en bastantes casos, podría reforzar la hipótesis antes enunciada de que la presencia de ciertas formas de lapiaz o sus dimensiones, tratadas estadísticamente, son capaces de proporcionar información significativa sobre el marco ambiental en el que se han desarrollado. De hecho, la escala de tiempo en que se pueden formar, es decir entre 10^5 y 10^1 años, permite investigar un rango de edades que van desde las últimas fluctuaciones climáticas del Cuaternario hasta las intervenciones humanas más recientes (pasando por la última glaciación, por las etapas cálidas postglaciales y por los primeros efectos perturbadores ocasionados por la llegada del hombre). Si fuera

LAPIAZ FORMADO POR AGUA QUE IMPACTA		Estrías	Acanaladuras	<i>Rillenkarren</i>
LAPIAZ FORMADO POR AGUA QUE CIRCULA	FLUJO CANALIZADO	Canalillos		<i>Decantation flutes</i>
		Canales estriados		<i>Regenrinnenkarren</i>
		Canales embudiformes		<i>Rinnenkarren</i>
		Canales de pared		<i>Wandkarren</i>
		Canales meandriformes		<i>Maänderkarren</i>
		Canales de decantación		<i>Decantation runnels</i>
	FLUJO SIN CANALIZAR	Escalones		<i>Trittkarren</i>
		Concavidades		<i>Cockling patterns</i>
		Ondulaciones		<i>Solution ripples</i>
LAPIAZ FORMADO POR AGUA QUIETA	ESTANCADA	Cubetas		<i>Kamenice</i>
		Pocillos		<i>Rainpits</i>
	ADHERIDA	Canalículos		<i>Microrills</i>
		Superf. oquerosas		<i>Cavernous weathering</i>
LAPIAZ FORMADO POR AGUA QUE SE INFILTRA		Lapiaz de diaclasas		<i>Kluftkarren</i>
		Canales redondeados		<i>Rundkarren</i>
		Criptolapiaz		<i>Subsoil karren</i>

Tabla I

posible detectar en las morfologías de lapiaz esas etapas, es evidente que las perspectivas que ofrecería este campo de estudio resultan todavía difíciles de imaginar.

Además de estos fenómenos de «inercia morfológica», también se pueden analizar muchas microformas (especialmente las de menor tamaño) en un contexto actualista: intentando reconocer en ellas la manifestación inmediata de las condiciones bioclimáticas vigentes en nuestros días. Si se admite que algunas morfologías de lapiaz son claramente postglaciales y que su mecanismo genético está gobernado por factores tales como cantidad e intensidad de precipitaciones, temperatura del medio, rocío, frecuencia de nevadas, aridez, capacidad de colonización por microorganismos, incendios, pérdida de suelo por deforestación, etc., se comprenderá cómo el lapiaz reúne todas las condiciones para convertirse en un valioso geoindicador ecológico en los ecosistemas kársticos, si se consigue elaborar una metodología adecuada para su interpretación.

Lapiaz y Deforestación

En las rocas calizas la interfase roca-aire o roca-suelo es objeto de procesos de *meteorización* mucho más sutiles y singulares que los que caracterizan a otras litologías. Ocasionalmente las formas producidas se desarrollan durante milenios y, en el caso del *Lapiaz cubierto*, permanecen ocultas bajo la capa de materiales edáficos donde la corrosión es muy eficaz y generalizada. El término *Criptolapiaz*, utilizado por algunos autores franceses como por ejemplo NICOD, parece ajustarse bien a la realidad, al designar el lapiaz que se genera por debajo de la superficie del suelo. Por esta razón lo he incorporado a la terminología que propongo.

Cuando las morfologías engendradas bajo cubierta edáfica sufren una erosión intensa, quedando desprovistas de suelo, las formas subterráneas heredadas van siendo sustituidas por otras que sólo pueden originarse al aire libre, sobre roca desnuda, como las que muestra la Foto 1. Aunque tradicionalmente se ha empleado la palabra *Lapiaz* para referirse a extensiones de roca caliza esculpidas al aire libre por los mecanismos de corrosión característicos de la karstificación, las canteras y cortes artificiales del terreno permiten observar cómo el esculpido de la roca es incluso más enérgico bajo la cobertura edáfica (donde las concentraciones de CO_2 son elevadas), produciendo además morfologías específicas de dicho medio (GAMS, 1973). La idea de que un lapiaz oculto (*Criptolapiaz*) se está conformando, bajo la aparente regularidad y homogeneidad del suelo cubierto de vegetación, se ha ido abriendo paso en la moderna bibliografía y ha llegado a trastocar las interpretaciones anteriores sobre la evolución del exokarst.

En realidad sólo cabe hablar estrictamente de *Lapiaz* desde el momento en que la «escultura» de la roca es observable. Esto sucede normalmente cuando el suelo es retirado por erosión, como consecuencia de cambios climáticos desfavorables para la vegetación o bajo la presión destructiva de ciertas actividades humanas: talas, incendios, pastoreo excesivo, etc. (SWEETING, 1972; JENNINGS, 1985). La sobreimposición de microformas de *lapiaz libre* modificando el aspecto original del *criptolapiaz*, después de haberse producido la eliminación artificial del bosque y la consiguiente erosión del suelo, ha sido bien documentada en la costa adriática de Yugoslavia por JAKUCS (1977) y GAMS (1987).

Una vez que la roca queda expuesta a la intemperie se inicia una interesante *sucesión colonizadora* sobre el nuevo sustrato a cargo de algas, hongos y líquenes, que «compiten» con el desarrollo progresivo de microformas de meteorización de origen casi exclusivamente físico-químico. La acción alterante o protectora de esos microorganismos ha sido objeto de varios trabajos (véase VILES, 1984), pudiendo interferir en la configuración del lapiaz (HEINEMANN *et al.*, 1977).

Las observaciones realizadas en la Serra de Tramuntana confirman que es posible reconocer abundantes formas de *criptolapiaz*, más o menos transformadas, en la mayoría de sus terrenos karstificados; incluso en los más espectaculares. Aun cuando en algunas localidades la sobreimposición de morfologías de lapiaz libre (como *estrías* y *escalones*) ha progresado mucho, predominando en el conjunto actual del paisaje, es fácil todavía identificar en ellas vestigios de la «escultura rocosa» heredada del tiempo en que la roca fue modelada por corrosión edáfica. En mayor o menor grado este hecho es válido para todo el lapiaz de la montaña mallorquina, si bien hay varios sectores donde el tiempo transcurrido y la elevada tasa de desarrollo de lapiaz libre han conseguido borrar casi por completo las huellas de *criptolapiaz*.

Las consecuencias que se derivan del reconocimiento de vestigios de lapiaz formado originariamente bajo suelo, en las extensiones calizas de la Serra de Tramuntana, plantean un sugestivo problema: ¿en qué momento o momentos se produjo la deforestación que ha posibilitado la pérdida de suelo y la exhumación del *criptolapiaz*? No obstante, es probable que la realidad haya sido incluso más complicada, ya que no se puede descartar que las tasas de pérdida vertical de suelo en el karst permitan un cierto grado de denudación «espontánea» del lapiaz, sin necesidad de que ocurra previamente una destrucción catastrófica de la cubierta vegetal. Por otra parte, aunque la deforestación artificial acarrea erosión del suelo y promueve el proceso de formación de campos de lapiaz rocosos, es preciso considerar tanto los efectos incuestionables de incendios (y otras intervenciones humanas) como la posibilidad de crisis ambientales, que hayan podido provocar la destrucción natural de la vegetación climática.



Foto 1: Aspecto típico del lapiaz que predomina en altitudes comprendidas entre 150 y 600 metros s.n.m. Se aprecian buenos ejemplos de Estrías (*Rillenkarren*), Canales embudiformes (*Rinnenkarren*) y Escalones (*Trittkarren*).

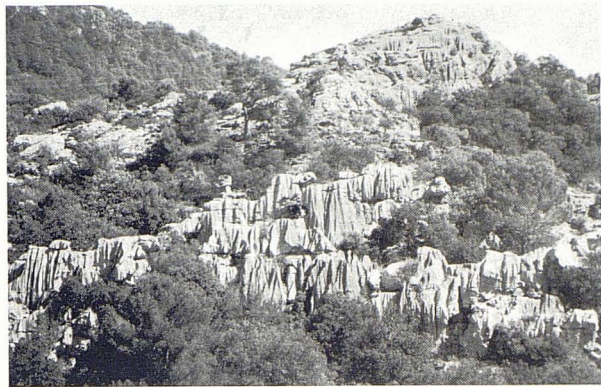


Foto 2: Conjunto de Pirámides de lapiaz (*Spitzkarren*) que emergen sobre un encinar de los alrededores de Lluç. Los surcos que presentan las Pirámides son Canales embudiformes (*Rinnenkarren*) y Canales de pared (*Wandkarren*) cuyas anchuras superan los 20 centímetros.



Foto 4: Canalillos (*Decantation flutes*), con anchuras superiores a los 3 cm, frecuentes en las montañas de la Serra de Tramuntana por encima de los 800 metros s.n.m. Generalmente estos pequeños surcos muestran un trayecto menos rectilíneo que las Estrías de lapiaz y presentan abundantes Conchaduras (*Cockling patterns*) a lo largo de su recorrido, como sucede en estos Canalillos del Puig de Massanella.



Foto 3: Canales embudiformes (*Rinnenkarren*) con Escalones (*Trittkarren*) y Estrías (*Rillenkarren*) vistos desde arriba; en los campos de lapiaz (*Karrenfeld*) de Es Castellots (Escorca).



Foto 5: Canaliculos (*Microrills*), de trayecto sinuoso y anchura que apenas sobrepasa los 0,6 mm, vistos desde arriba; en un lapiaz de la Serreta de Cúber (Escorca).

Las estimaciones que se están realizando sobre Abundancia de Criptolapiaz Relicto (A.C.RE.) o sobre Intensidad de Modificación del Lapiaz al Aire Libre (I.M.L.A.L.) apenas han sido iniciadas en la Serra de Tramuntana. Por consiguiente los datos disponibles son todavía escasos y faltos de suficiente base cuantitativa. Sin embargo las observaciones efectuadas parecen sugerir 3 hipótesis, no excluyentes, para explicar la evolución de los campos de lapiaz mallorquines: 1) *Deforestación antropógena*, causada directamente por las actividades humanas; 2) *Deforestación climático-edáfica*, como resultado de la acción repetida de climas periglaciares en lo alto de las montañas durante las glaciaciones; y 3) *Deforestación karstógena*, en el supuesto de que la intensidad de la karstificación llegara a producir una pérdida vertical de suelo, a través de fisuras ensanchadas, superior a la tasa de edafogénesis local. En este sentido, dos aspectos específicos del karst deberían ser tenidos en cuenta para considerar la posible validez de estas 2 últimas hipótesis: a) en rocas calizas muy puras la tasa de producción de suelo es bastante baja; y b) en terrenos fuertemente karstificados la pérdida vertical de suelo, a través de grietas, puede superar a la pérdida oblicua de suelo en vertientes y laderas.

Probablemente la *deforestación antropógena* podría ser estudiada con éxito en las montañas que rodean Pollença, mientras que la *deforestación climático-edáfica* habría de ser comprobada en los picos más altos de la cordillera, que coinciden con el llamado «piso culminal baleárico» de vegetación (caracterizado por la sorprendente carencia de formaciones boscosas). Por último, la *deforestación karstógena* debería tomar como punto de referencia los alrededores de Lluc, donde magníficas *pirámides de lapiaz* sobresalen por encima del bosque de encinas (Foto 2). Habrá de ser objetivo de futuras investigaciones el intentar evaluar cuál es el papel de cada uno de los procesos de deforestación/pérdida de suelo en el contexto de las diferentes localidades.

Observaciones cuantitativas sobre el Lapiaz de Acanaladuras

Al mismo tiempo que se comenzaba la recolección de datos cuantitativos en casi un centenar de localidades distribuidas a lo largo de la Serra de Tramuntana (mediante los cuales se pretendía sistematizar con una base numérica la tipología del lapiaz), ya desde el primer momento se dedicó una atención especial al estudio morfométrico del *lapiaz de acanaladuras*.

El término *acanaladuras* es la traducción literal de *lapiaz à cannelures* (GÈZE, 1973) y equivale al término alemán *Rillenkarren* (TRIMMEL, 1965; SWEETING, 1972), ampliamente utilizado en la bibliografía interna-

cional. Por otra parte, la expresión «acanaladura» es bastante gráfica y puede ser empleada con comodidad en lengua castellana, pero presenta el inconveniente de sugerir quizás más de lo deseable cierta relación genética con la canalización del agua de lluvia, lo que recientes investigaciones han desmentido concluyentemente (véase FORD & LUNDBERG, 1987). Además en esa misma publicación era descrita una nueva morfología de lapiaz, denominada *decantation flutes*, que podría prestarse a confusión con el *Rillenkarren*. Debido a esta ambigüedad he optado por agrupar ambas formas de «aspecto acanalado» con el término meramente morfológico de *Acanaladuras*, reservando la palabra *Estría de lapiaz* para el *Rillenkarren* en sentido estricto.

La atención especial que se le prestó al lapiaz de acanaladuras en las localidades que se iban mostrando respondía a cuatro motivos principales: 1) las *acanaladuras* son las formas de lapiaz más sencillas desde un punto de vista geométrico y por lo tanto son fáciles de medir, pudiendo ser sometidas a tratamiento estadístico sin demasiados problemas; 2) sería interesante establecer una diferenciación rigurosa entre *Rillenkarren* y *Decantation flutes*, fundamentada en criterios exclusivamente morfométricos; 3) según algunos autores, incluido BÖGLI (1980), cabría esperar una mayor longitud del surco (*Rill*) cuanto más cálido fuera el clima, como consecuencia de los procesos físico-químicos implicados en su formación; y 4) si esta tipología elemental presentase diferencias morfométricas significativas en distintos lugares de la Serra de Tramuntana, podría ensayarse su empleo en la caracterización de las eventuales zonaciones altimétricas que se descubrieran durante el estudio. Lo cierto es que los resultados obtenidos tras dos años de mediciones en 50 localidades diferentes han superado las expectativas más optimistas.

La primera etapa consistió en elaborar una metodología de muestreo adecuada. Se optó por escoger estaciones de aproximadamente 50 m² de superficie. En ellas se medía la longitud de las 10 *estrías* más largas, o de las 20 mayores cuando esta morfología era abundante. También se medía la anchura del surco (entre cresta y cresta) de 40, 50, 100 o 120 *estrías*, o de cualquier otra morfología que pudiera parecerse. Los resultados obtenidos en las mediciones se resumen en el listado de la Tabla II, que a su vez contiene los datos que han servido de base para la realización de la Figura 2.

Simultáneamente a la recolección de estas medidas de longitud y anchura, se anotaban unas estimaciones semicuantitativas de las especies vegetales y de las morfologías de lapiaz que acompañaban a las *acanaladuras* en cada estación o localidad, indicando el grado de predominio de las *acanaladuras* en cada campo de lapiaz. Obviamente la ficha de todas las localidades incluía sus coordenadas UTM, la altitud s.n.m. y los datos de temperatura media y precipita-

ciones anuales extraídos del trabajo de GUIJARRO (1986).

Las mediciones de longitud de las 10 estrías más largas (llevadas a cabo en 40 localidades) han proporcionado valores comprendidos entre 10,8 y 46,3 cm, aunque ciertamente el valor inferior es arbitrario ya que existen estaciones con estrías embrionarias o mal desarrolladas que podrían dar medidas incluso menores. En el curso de las observaciones se constató enseguida que en aquellas localidades cuyas precipitaciones no llegan a los 800 mm anuales la presencia de *estrías de lapiaz* es sólo esporádica, sin llegar a predominar en ningún caso sobre el conjunto del lapiaz. Además, en esas localidades «más áridas», las estrías son siempre pequeñas, por más que sus anchuras se mantengan similares a las anchuras medidas en localidades más lluviosas (véanse por ejemplo los datos de CBL, CM1 y ORT, con longitudes que apenas superan los 20 cm y anchuras medias de 17 y 15 mm). Su distribución geográfica, en la periferia de la Serra de Tramuntana, es debida a la disposición de los gradientes de precipitaciones que delimitan máximos de lluvia en los núcleos centrales de la alineación montañosa.

Una vez descartadas las localidades en cuyo contexto las estrías de lapiaz son raras, y que corresponden precisamente a lugares caracterizados por precipitaciones moderadas o escasas, se elaboró una representación gráfica que incluyera los datos de las 33 localidades restantes (Figura 2). En ella puede apreciarse cómo existe una fuerte relación negativa entre la altitud de las localidades s.n.m. y la longitud media de las estrías más largas. La interpretación de la gráfica parece sencilla, puesto que el gradiente altitudinal se manifiesta en este caso como un gradiente de descenso de temperatura a medida que se remonta por las laderas de la Serra de Tramuntana. Si se comparan los valores extremos procedentes de VM2 (altitud: 150 s.n.m.; longitud media estrías = 41,9 cm) y de PM2 (altitud: 1.190 s.n.m.; longitud media estrías = 14,4 cm), así como el conjunto de datos intermedios, esta tendencia resulta evidente. El ajuste de una recta

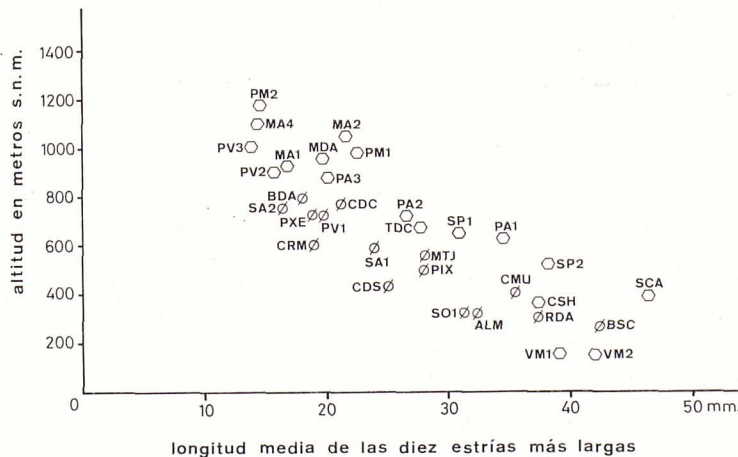
de regresión a la nube de puntos que proporcionan las 33 localidades, cuya situación geográfica aproximada queda indicada en la Figura 3, es tan satisfactorio ($r^2 = 0,8$) que la hipótesis que postulaba un mayor alargamiento de las *estrías de lapiaz* ligado al aumento de temperatura se ve claramente reforzada.

La importancia del factor temperatura en la longitud de las *estrías* probablemente es muy notable. En la Figura 2 se han utilizado dos símbolos distintos para significar la ubicación general a macroescala de las localidades muestreadas, en la «solana» o «umbría» de la cordillera: el hexágono indica vertientes «cálidas» orientadas hacia el SE, mientras que el círculo atravesado designa vertientes «frescas» orientadas hacia el NW. Otra prueba del papel determinante desempeñado por la temperatura se refiere a la orientación que presentan a mesoescala los buenos afloramientos de *estrías*, los cuales sólo aparecen en su óptimo desarrollo en aquellas losas de roca dirigidas hacia el SE-S-SW, de acuerdo con las observaciones de HEINEMANN *et al.* (1977).

Las mediciones de anchura, por el contrario, mostraron una notable constancia en la casi totalidad de las localidades prospeccionadas. En efecto, los valores de las medias de anchura oscilan entre 15 y 17 mm, en los campos de lapiaz situados a alturas comprendidas entre 20 y 750 metros s.n.m., en tanto que los valores modales se establecen entre 12 y 19 mm. Si estas observaciones se comparan con los datos morfométricos publicados por DUNKERLEY (1979) y con los reunidos por FORD & LUNDBERG (1987) la concordancia resulta evidente. Sólo la localidad QLL y el conjunto de mediciones y observaciones efectuadas en las principales montañas, por encima de los 800 metros s.n.m., se distancian de los valores medios propios del *Rillenkarren* (véanse los datos de AU2, MA3, PDA y SA3).

Las curvas de distribución de frecuencias son también muy similares en todos los campos de lapiaz situados por debajo de la cota 750 s.n.m. (así sucede con CBL, CMU, CM1, CSH, ORT, PIX, PXE, SCA, SO2, SP2, TRC, VM1 y VM2), tal como está docu-

Figura 2:
Relación entre la altitud sobre el nivel del mar, en 33 localidades de la Serra de Tramuntana (con precipitaciones superiores a los 800 mm. anuales), y la longitud media de las 10 estrías de lapiaz (*Rillenkarren*) más largas de cada localidad.



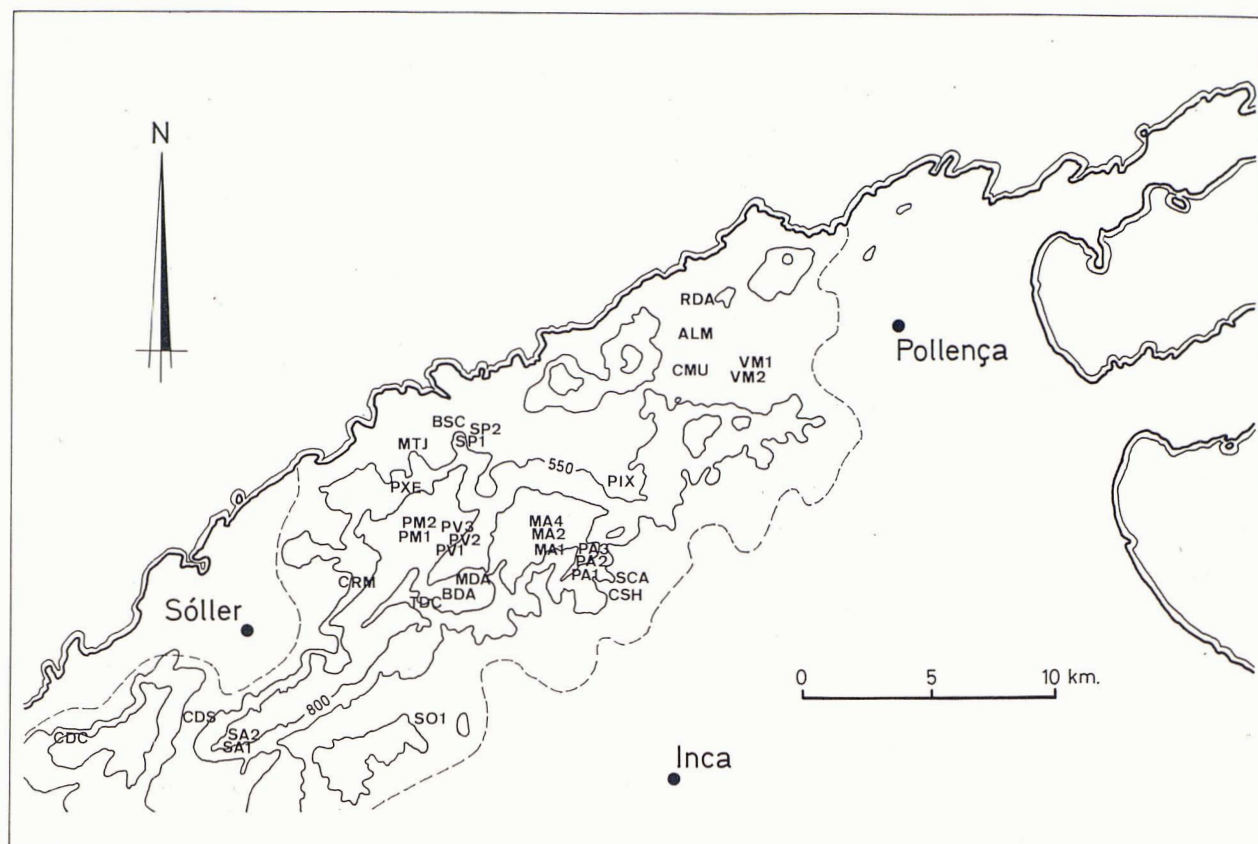


Figura 3: Situación de las localidades en que se han efectuado observaciones morfométricas sobre la longitud máxima de sus estrías de lapiaz. En el dibujo se incluyen las curvas de nivel correspondientes a las cotas de 550 y 800 metros s.n.m., así como la isoyeta de los 800 mm. anuales de precipitaciones.

mentado en GINÉS (1989). La distribución de frecuencias de anchura procedente de QLL, localidad ubicada a 550 metros s.n.m., es la única excepción entre las que han sido estudiadas puesto que se registran unas dimensiones mayores que las normales. Este hecho quizás podría atribuirse a la presencia de una cubierta arbórea de encinar en sus inmediaciones. Algunos investigadores han propuesto que la anchura de las acanaladuras puede guardar cierta relación con el tamaño de las gotas que impactan sobre la roca. Si se confirmara esta hipótesis, ello explicaría las anchuras anómalas que se observan en algunas estaciones de bosque clareado; sin olvidar que las morfologías de *Rillenkarren* (*estrías de lapiaz*) no son compatibles con un bosque denso, por tratarse de formas de *lapiaz libre* (*Freie Karren*) en el sentido de BÖGLI (1980).

Por lo tanto, sólo se han podido detectar anomalías en los valores medios de anchura y en las curvas de distribución de frecuencias cuando se dan dos situaciones fáciles de identificar: a) en localidades influidas por la proximidad de árboles, tal como acaba de mencionarse; y b) en localidades emplazadas por encima de los 800 metros s.n.m., donde es difícil distinguir las *estrías* de otras microformas muy semejantes atribuibles al tipo de lapiaz denominado *decantation*

flutes. Estas anomalías se aprecian fácilmente en la Figura 4, en la que se compara la distribución de frecuencias de anchura correspondientes a MA3 (1.075 metros s.n.m.) y CMU (410 metros s.n.m.). En mi opinión la localidad Coll Font de s'Avenç (MA3) contiene una población mixta de *Rillenkarren* (= *Estrías*) y de *Decantation flutes* (= *Canalillos*), difíciles de distinguir en la práctica. No obstante, el análisis de las curvas de distribución de frecuencias, obtenidas a partir de los datos pertenecientes a otras 15 localidades, demuestran que las poblaciones de *estrías* típicas (Foto 3) raramente poseen acanaladuras que sobrepasen los 25 mm. de anchura, lo cual permitiría separar ambas clases de acanaladuras sobre una base numérica más objetiva.

Probablemente los caracteres diagnósticos de los *Canalillos*, entendiendo por tales las acanaladuras que desde un punto de vista genético corresponden al concepto de *Decantation flutes* (FORD & LUNDBERG, 1987; FORD & WILLIAMS, 1989), serían: 1) anchuras medias superiores a los 25 mm; 2) trayecto menos rectilíneo que en el caso de las *estrías*; 3) presencia frecuente de concavidades en el interior del surco (Foto 4); y 4) nacimiento de la acanaladura generalmente en los flancos de la roca y sólo de un modo ex-

LOCALIDAD		Altitud en metros s.n.m.	Longitud máxima de las estrías en centímetros		Anchura de las estrías en milímetros, incluyendo canalillos		
Código	Municipio		media	n	media	n	moda
ALM	Escorca	325	32,5	10			
ALM	Escorca	325	29,4	20			
AU2	Escorca	1.000			47	10	
AU3	Escorca	1.020			52,3	6	
BDA	Escorca	800	19,3	5			
BSC	Escorca	230	42,35	10			
CBL	Pollença	40	16,3	10	15,7	50	14
CBU	Bunyola	450	13	5			
CDC	Deià	775	21,15	10			
CDS	Sóller	440	25	10			
CMU	Escorca	410	35,5	10			
CMU	Escorca	410	27,3	25	15,3	100	15
CM1	Andratx	50	14,35	10	17,3	100	19
CM2	Andratx	50	15,1	10			
CM2	Andratx	50	14,13	15			
CRM	Fornalutx	610	18,9	10			
CSH	Selva	350	37,2	10			
CSH	Selva	350	32,8	20	16,15	100	15
FO1	Pollença	110	24,5	10			
FO2	Pollença	140	21,15	10			
MA1	Escorca	925	16,65	10			
MA2	Escorca	1.050	21,6	10			
MA3	Escorca	1.075			27,4	120	25
MA4	Escorca	1.100	14,35	10			
MDA	Escorca	950	19,5	10			
MTJ	Escorca	560	27,95	10			
ORT	Andratx	200	23,65	10	15,24	100	14
PA1	Selva	630	34,3	10			
PA2	Selva	720	26,5	10			
PA3	Selva	870	20	10			
PA4	Selva	970	33,2	10			
PDA	Valldemossa	890			36,1	50	35
PIX	Escorca	490	28	10			
PIX	Escorca	490	26,15	20	15,9	100	17
PM1	Escorca	970	22,3	10			
PM2	Escorca	1.190	14,4	10			
PSB	Andratx	400	10,8	10			
PV1	Escorca	725	19,5	10			
PV2	Escorca	900	15,5	10			
PV3	Escorca	1.000	13,85	10			
PXE	Escorca	730	19,05	10	16,9	100	16
QLL	Escorca	550			23,2	40	22
RDA	Pollença	310	37,35	10			
SA1	Bunyola	600	24,05	10			
SA2	Bunyola	750	16,4	10			
SA3	Bunyola	775			40,3	15	
SCA	Selva	380	46,3	10			
SCA	Selva	380	39,75	20	16,02	120	16
SO1	Alaró	325	31,3	10			
SO2	Alaró	320			14,98	100	15
SP1	Escorca	650	30,8	10			
SP2	Escorca	550	38,15	10			
SP2	Escorca	550	34,1	20	17,08	120	14
TDC	Escorca	670	27,6	10			
TRC	Escorca	650			17	100	15
VM1	Pollença	150	39	10			
VM1	Pollença	150	34,25	20	18,38	120	15
VM2	Pollença	150	41,9	10			
VM2	Pollença	150	37,65	20	17,06	120	12

Tabla II

Localidad	Anchura en mm.: 5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	≥40
SCA (380 s.n.m.)	0	0	1	1	6	5	9	13	3	10	10	14	9	6	4	7	9	3	2	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
MA3 (1.075 s.n.m.)	0	0	0	0	0	0	1	1	2	5	0	4	1	3	6	2	6	5	1	10	5	11	3	1	7	8	5	7	1	7	5	1	0	0	1	11

n = 120

Tabla III

cepcional en el ápice de la roca. Para facilitar la comparación entre ambos tipos de acanaladuras, la Tabla III incluye las medidas procedentes de MA3 y las de SCA, siendo esta última una localidad típica de *estrias de lapiaz*.

Zonación altitudinal del Lapiaz

La distribución de los diversos tipos de morfologías de lapiaz en la Serra de Tramuntana parece sugerir una clara zonación altitudinal, que ya había sido planteada en anteriores trabajos (GINÉS & GINÉS, 1989; GINÉS, 1989). La disposición geográfica de la cordillera, relativamente simétrica y con gradientes térmicos y pluviométricos que casi se superponen a las curvas de nivel, propicia unas condiciones excepcionales para comprobar esa posible distribución zonada de las formas de lapiaz y para intentar evaluar los factores ambientales que puedan incidir en cada contexto geo-ecológico local.

Los datos que la campaña de observaciones ha permitido reunir hasta la fecha, después de prospec-

cionar un total de 98 estaciones que se extienden desde el Cap Andritxol hasta la península de Formentor, constituyen una base suficiente para poder afirmar que las morfologías de lapiaz siguen pautas de distribución relativamente concéntricas en torno a las montañas más altas de la Serra de Tramuntana. Las diferencias entre conjuntos de microformas exokársticas son consistentes con esa estructura zonada y los límites separadores de zonas probablemente podrán ser delimitados con bastante facilidad, utilizando criterios cuantitativos, en breve plazo de tiempo; cuando la metodología que está siendo elaborada se afine y contraste con otras estaciones representativas, ya durante el año próximo. Sin duda hay todavía mucho trabajo por hacer y además numerosas cuestiones permanecen poco resueltas, pero sorprende la claridad con que se manifiestan las distintas bandas zonales, posibilitando así la aplicación de técnicas matemáticas procedentes del campo de la Ecología numérica.

De una manera semicuantitativa y como un avance de las evidencias que se han logrado recolectar en el transcurso de estos dos últimos años, estableceré en las líneas siguientes una propuesta de división zonal,

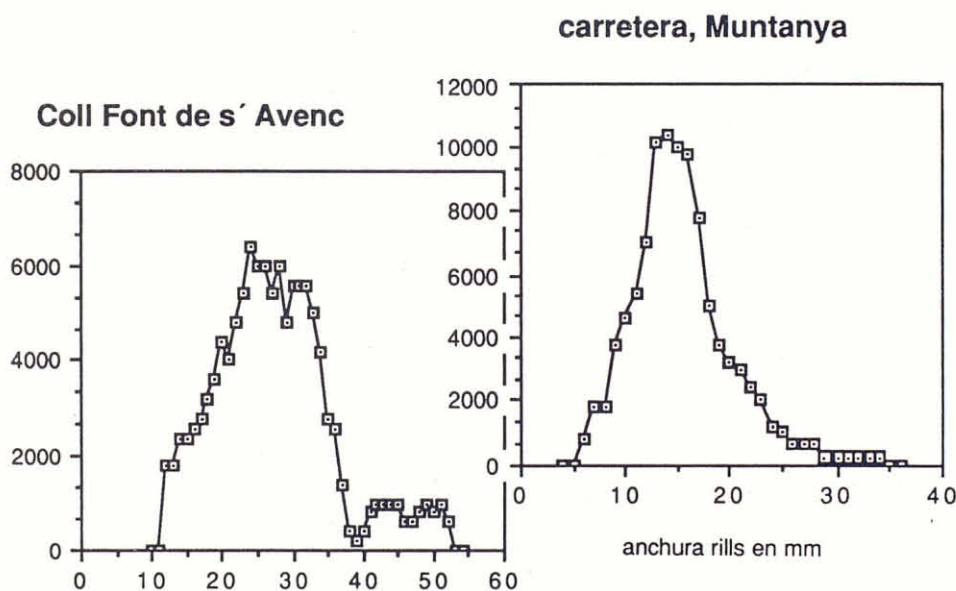


Figura 4: Comparación de las distribuciones de frecuencia que presentan las mediciones de acanaladuras obtenidas en la localidad carretera - Muntanya CMU (anchura media = 15 mm, moda = 15 mm) y en la localidad Coll Font de s'Avenc - Puig de Massanella MA3 (anchura media = 27,4 mm, moda = 25 mm). Mientras los datos de CMU pertenecen a típicas estrias de lapiaz, es probable que las

«acanaladuras» de MA3 correspondan a *Decantation Flutes* en el sentido de FORD & LUNDBERG (1987). Las medidas fueron obtenidas y agrupadas en clases de 1 mm, siendo posteriormente suavizadas durante la realización de la gráfica; los valores que aparecen en ordenadas son, por consiguiente, arbitrarios.

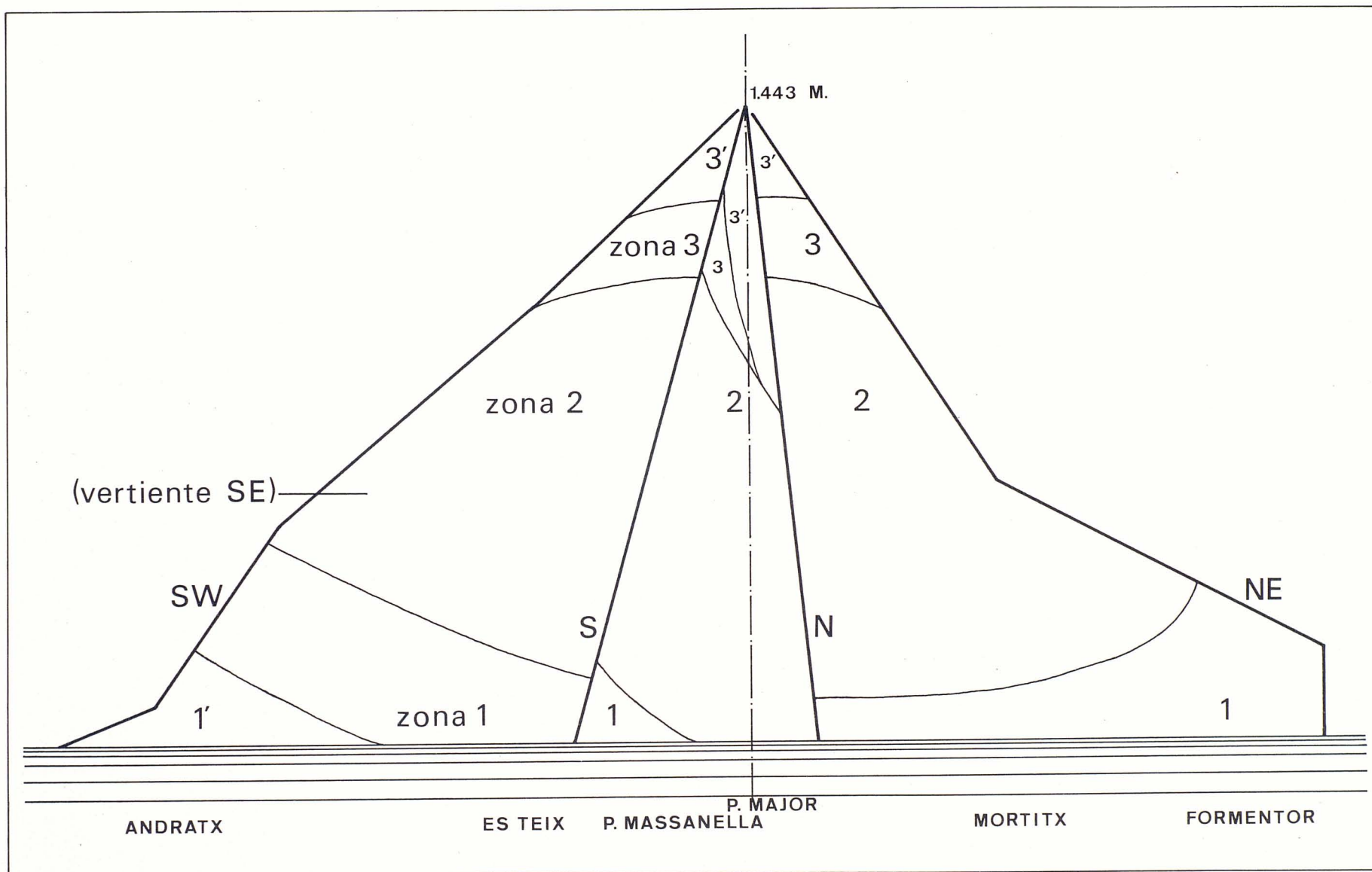


Figura 5: Diagrama esquemático en el que se sugiere una distribución zonada de las principales morfologías de lapiaz, tal como se observan en la Serra de Tramuntana (Mallorca).

según aparece expresada gráficamente en la Figura 5. En ella se distinguen 3 franjas principales: una zona periférica caracterizada por su mayor aridez (**zona 1**); una zona intermedia en la que el lapiaz se impone con fuerza dentro del paisaje (**zona 2**); y una zona superior, por encima de los 800 metros en la vertiente N pero que puede comenzar a los 1.100 metros de altitud en las laderas S de las montañas (**zona 3**). Junto con esas tres zonas, donde el lapiaz se muestra bajo diferentes conjuntos de microformas bien definidas, he incorporado dos subzonas extremas que se podrían calificar de *lapiaz indiferenciado*. En ambas subzonas no se reconocen formas elementales de lapiaz aunque tampoco faltan pequeñas huellas de corrosión; por el contrario la presencia de una intensa colonización líquénica parece indicar que los microorganismos rupícolas son los más importantes agentes de meteorización en esos terrenos. Atendiendo a este hecho habría motivos suficientes para considerar las dos subzonas como sendos casos particulares de *Biokarst* (ver VILES, 1984).

La **subzona 1'** carece de morfologías exokársticas destacables, a excepción de *lapiaz de diaclasas* poco abundante y *criptolapiaz* de aspecto cavernoso. En cambio, la superficie de las rocas está, por lo general, bien colonizada por líquenes xéricos que llegan a alcanzar coberturas bastante considerables. Algunos *pocillos* y *cubetas* muy rudimentarias son las únicas microformas elementales que llegan a estar representadas. Las estrías no se desarrollan bien y apenas pueden reconocerse. El extremo SW de la cordillera, incluyendo la Serra de na Burguesa, pertenecería a esta subzona, que probablemente debe estar relacionada con la escasez de precipitaciones (por debajo de 500 mm anuales).

La **zona 1** comprendería toda una banda periférica al pie de la alineación montañosa, faltando en la vertiente N del sector que se extiende desde el Puig de Bàltx hasta las estribaciones septentrionales del Puig de Ternelles. Está bien representada en la península de Formentor y en las montañas de la comarca de Andratx, donde es posible encontrar pequeños afloramientos aislados de *estrías de lapiaz* y algunos raros *canales de pared*. Predomina el lapiaz formado por agua quieta, habiendo varias localidades muy típicas de esta clase de microformas: *pocillos* en el Mirador de Es Colomer (Formentor, Pollença), *cubetas* en las lomas que rodean Sa Trapa (Andratx) y *canaliculos* en Coves Blanques (Pollença). Sintomáticamente parece que las microformas producidas por agua circulante no logran imponerse, mientras que las *etched forms* en el sentido de WHITE (1988) dominan de un modo evidente. Quizás ello podría obedecer a la cantidad moderada de precipitaciones que reciben estos terrenos periféricos (entre 500 y 800 mm anuales).

La **zona 2** abarca la totalidad de los *campos de lapiaz* más espectaculares de la Serra de Tramuntana. En parte, las grandes *pirámides de lapiaz* (*Spitz-*

karren) que la caracterizan pertenecen a una herencia geomorfológica muy difícil de atribuir a los climas postglaciales, por las dimensiones excesivas que poseen. Pero es innegable que las formas decimétricas de lapiaz, como los *canales de pared* y *canales embudiformes* aparecen en gran profusión. Aún mayor valor diagnóstico presentan los *canales estriados* y *escalones*, que alcanzan su óptimo en esta zona; así como las *estrías de lapiaz*, cuyas dimensiones van menguando a medida que se asciende, pero manteniendo (en esta banda zonal) siempre longitudes medias máximas por encima de 20 cm. La abundancia de *canales* (*embudiformes*, *estriados* y *de pared*), surcados a su vez por numerosas *estrías*, dan un aspecto verticalizado a los extensos campos de lapiaz que ocupan esta **zona 2**, ya que los *escalones* horizontales quedan ocultos en el interior de los magníficos *canales*. Resulta patente el predominio del lapiaz formado por agua que circula, lo cual puede estar relacionado con una excepcional combinación de temperaturas altas y precipitaciones bastante considerables (entre 800 y 1.100 mm anuales). Tampoco se puede ignorar la ausencia de efectos destructivos periglaciares en estas altitudes más bien moderadas (entre 150 y 850 metros s.n.m. por término medio).

La **zona 3** corresponde a las partes altas de las montañas y viene delimitada por la progresiva extinción de las *estrías de lapiaz* y su sustitución por *canalillos* de mayor anchura y de trayecto algo sinuoso. Paralelamente los *escalones* son reemplazados por *concavidades* y *ondulaciones*, las cuales en las cotas inferiores de esta zona (que va desde los 800 a los 1.200 metros s.n.m. aproximadamente) dan un aspecto horizontal al conjunto del lapiaz, debido a que aparecen dispuestas en tendencias más o menos escalonadas. Hacia arriba estas tendencias se vuelven más irregulares. Los *canales* pierden verticalidad e importancia, quedando únicamente bien representados los *canales de decantación* y *canales meandriformes* junto a escasos *canales de pared*. Se constata un predominio del *lapiaz de diaclasas* y de las formas generadas por agua que circula sin canalizar; sobre todo de las morfologías de decantación (FORD & WILLIAMS, 1989). Las temperaturas más bajas y las precipitaciones superiores a los 1.100 mm anuales deben ser las responsables de estos cambios morfológicos en el lapiaz. Tampoco hay que descartar la acción heredada de climas periglaciares que hayan arrasado las crestas y salientes, aplanando los afloramientos de roca caliza y potenciando probablemente topografías favorables a las formas de decantación.

La **subzona 3'** vuelve a ser otra banda de *biokarst* donde predomina la colonización de líquenes, sobre todo endolíticos, alcanzando coberturas de casi el 100 %. La pobreza de formas de lapiaz es manifiesta, limitándose a *lapiaz de diaclasas* y a pequeños *canales de decantación* en las orillas de las losas calcáreas. Las cumbres de las principales montañas entra-

rían dentro de esta subzona quizás como resultado del efecto de las nubes persistentes y del rocío. En las vertientes orientadas hacia el N y en sectores umbríos este ambiente morfogenético dominado por los líquenes endolíticos puede descender hasta por debajo de los 700 metros s.n.m., aunque la comunidad líquénica cambia y aparecen también líquenes epilíticos y *canaliculos* (Foto 5) que podrían indicar el importante papel del rocío en estos microambientes extremos.

Evidentemente estas páginas no son otra cosa que apuntes provisionales, basados en un largo trabajo de campo, pero que requieren aún más prospecciones sobre el terreno y todavía mayor tratamiento numérico a desarrollar en el futuro. Pero lo que se pretendía era sentar las bases de una metodología original que permite interpretar las microformas de lapiaz como auténticos geoindicadores ecológicos. Las perspectivas que se abren al poder asociar zonas de lapiaz con zonas de vegetación se encaminan en esa dirección.

Bibliografía

- BÄR, W.-F. (1989): «Atlas Internacional del Karst. Hoja 5: Lluc/Sierra Norte (Mallorca)». *Endins*, 14-15: 27-42. Palma de Mallorca.
- BÄR, W.-F.; FUCHS, F. & NAGEL, G. (1986): «Lluc/Sierra Norte (Mallorca). Karst einer Mediterranen Insel mit Alpidischer Struktur». *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. suppl. 59, karst: 27-48. Berlín.
- BAUER, F. (1962): «Nacheiszeitliche Karstformen in den Österreichischen Kalkhochalpen». *Actes du 2ème Congr. Internat. Spéléologie*, I: 299-328. Bari.
- BÖGLI, A. (1960): «Kalklösung und Karrenbildung». *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. suppl. 2: 4-21. Berlín.
- BÖGLI, A. (1976): «Die wichtigsten Karrenformen der Kalkalpen». in Gams, I. Ed. «Karst processes and relevant landforms», International Speleological Union, Symposium on karst denudation: 141-149. Ljubljana.
- BÖGLI, A. (1980): «Karst Hydrology and Physical Speleology». Springer-Verlag. 284 págs. Berlín.
- COLOM, G. (1975): «Geología de Mallorca». Ed. Instituto de Estudios Baleáricos. 2 vols. 519 págs. Palma de Mallorca.
- COLOM, G. (1982): «Geomorfología de Mallorca. El relieve y la forma de sus montañas». Gráficas Miramar. 165 págs. Palma de Mallorca.
- DARDER, B. (1930): «Algunos fenómenos cársticos en la isla de Mallorca». *Ibérica*, 32 (núm. 818): 154-156. Barcelona.
- DUNKERLEY, D.L. (1979): «The morphology and development of Rillenkarren». *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. 23(3): 332-348. Berlín.
- DZULYNSKI, S.; GIL, E. & RUDNICKI, J. (1988): «Experiments on Kluffkarren and related Lapies forms». *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. 32(1): 1-16. Berlín.
- FALLOT, P. (1922): «Étude géologique de la Sierra de Majorque». Impr. Béranger. 480 págs. París.
- FORD, D.C. & LUNDBERG, J. (1987): «A review of dissolutional rills in limestone and other soluble rocks». *Catena* suppl. 8: 119-140. Braunschweig.
- FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. (1989): «Karst Geomorphology and Hydrology». Unwin Hyman Ltd. 601 págs. Londres.
- GAMS, I. (1973): «Forms of subsoil karst». *Proceedings of the 6th International Congress of Speleology*. Vol II: 169-179. Olomouc.
- GAMS, I. (1987): «Adaptation of the karst land for the agrarian use in the Mediterranean. Problems of research and of conservation (A survey)». *Endins*, 13: 65-70. Palma de Mallorca.
- GÈZE, B. (1973): «Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie». *Annales de Spéléologie*, 28(1): 1-20. Moulis.
- GINÉS, A. (1989): «Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Primeros datos». Memoria de investigación 3.º Ciclo, Univ. de les Illes Balears. 86 págs. Palma de Mallorca.
- GINÉS, A.; GINÉS, J.; POMAR, L. & SALVÀ P.A. (1979): «La Serra de Tramuntana». VI Coloquio de Geografía. Excursión núm. 1. 38 págs. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1979): «L'Aenc Fonda (Pollença, Mallorca). Situación y morfología exterior». *Endins*, 5-6: 39-42. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1989): «El Karst en las Islas Baleares». in Durán, J. J. & López-Martínez, J. Eds. «El Karst en España», S.E.G. Monografía 4: 163-174. Madrid.
- GUIJARRO, J.A. (1986): «Contribución a la Bioclimatología de Baleares». Tesis Doctoral, Univ. de les Illes Balears. 232 págs. y anexos. Palma de Mallorca.
- HEINEMANN, U.; KAADEN, K. & PFEFFER, K.-H. (1977): «Neue Aspekte zum Phänomen der Rillenkarren». *Abh. Karst-Höhlenkunde A*, 15: 56-80. Festschrift Alfred Bögli. Stuttgart.
- JAKUCS, L. (1977): «Morphogenetics of karst regions. Variants of karst evolution». *Akadémi Kiadó*. 284 págs. Budapest.
- JENNINGS, J.N. (1985): «Karst Geomorphology». Basil Blackwell Ltd. 293 págs. Oxford.
- LOZANO, R. (1884): «Anotaciones físicas y geológicas de la Isla de Mallorca». 68 págs. Palma de Mallorca.
- MAIRE, R. (1980): «Éléments de Karstologie physique». *Spelunca*, spécial n.º 3: 1-57. Millau.
- MARTEL, E.A. (1903): «Les cavernes de Majorque». *Spelunca (Bull. et Mém. de la Société de Spéléologie)*, Vol. 5, núm. 32: 1-32. París.
- MENSCHING, H. (1955): «Karst und Terra Rossa auf Mallorca». *Erdkunde*, 9: 188-196. Bonn.
- PAGENSTECHE, H.A. (1867): «La isla de Mallorca». Imprenta Guasp. 194 págs. Palma de Mallorca.
- PERNA, G. & SAURO, U. (1978): «Atlante delle microforme di dissoluzione carsica superficiale del Trentino e del Veneto». *Memorie del Museo Tridentino di Scienze Naturali*, 22 nueva serie: 1-176. Trento.
- PRAESENT, H. (1911): «Bau und Boden der Balearischen Inseln». *Jahresbericht der Geogr. Gesellsch.*, 13: 19-106. Greifswald.
- SWEETING, M.M. (1972): «Karst Landforms». The Macmillan Press. 362 págs. Londres.
- TRIMMEL, H. (1965): «Speläologisches Fachwörterbuch». Landesverein für Höhlenkunde in Wien und Niederösterreich. 109 págs. Viena.
- VILES, H.A. (1984): «Biokarst: review and prospect». *Progress in Physical Geography*, 8(4): 523-542. Londres.
- WHITE, W.B. (1988): «Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains». Oxford University Press. 464 págs. Nueva York.